

전기저항 콘 프로브를 이용한 해안지반의 간극률 산정

Porosity estimation using electrical resistance Cone Probe in offshore soils

이종섭¹⁾, Jong-Sub Lee, 김준한²⁾, Joon Han Kim, 윤형구³⁾, Hyung-Koo Yoon, 조태현⁴⁾, Tae-Hyeon Cho, 최용규⁵⁾, Yong Kyu Choi

- 1) 고려대학교 건축·사회환경공학과 부교수, Associate Professor, Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University.
- 2) 고려대학교 건축·사회환경공학과 석사과정, Graduate Student, Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University.
- 3) 고려대학교 건축·사회환경공학과 박사과정, Ph.D. Student, Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University.
- 4) 고려대학교 건축·사회환경공학과 석사과정, Graduate Student, Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University.
- 5) 경성대학교 토목공학과 교수, Professor, Department of Civil Engineering, Kyung Sung University

SYNOPSIS : The electrical resistivity methods have been commonly used for figuring out the ground layers. The purpose of this paper, differently from previous methods, is not only to figure out the layers but also to develop a equipment and a method to analyze ground porosity. Equipment has a shape of cone, which can be coupled with drilling rods. A field penetration test was performed to test application in Incheon Chungla area. Through the field test soil resistances were measured. To calculate soil porosity along the depth, Archie's law is applied. The results show that a new equipment and porosity analysis method using Archie's law can distinguish soil layers and precisely measure soil porosity.

Key words : Conductivity, Electrical resistance, LCR meter, Porosity, Void ratio

1. 서 론

전극 사이 지반의 전류와 전위를 측정하여 흙의 비저항 및 전도도 등을 측정하여 지층의 특성을 파악하는 것이 전기비저항 탐사법이다. 전기비저항 탐사에 사용되는 장비는 여러 개의 전극을 지표에 설치하는 방식이나 콘의 Friction sleeve 뒤쪽에 웨너 전극을 설치하는 방식 등이 있다(방은석 외, 2007). 전자와 후자의 경우 전극 사이의 간격이 커서 전극간의 평균적인 비저항을 측정한다. 전기비저항 탐사법은 매립 폐기물 및 시설탐지, 오염원 파악, 지하수 오염 등 오염토양 조사에 쓰인다. 또한 지금은 3차원 전기비저항 탐사의 개발로 지질구조를 3차원으로 영상화하는 단계에 이르고 있다. 하지만 기존의 전기비저항 탐사장비들은 지층의 대략적인 구조파악이나 오염물질의 존재여부 조사는 가능하지만 지반정수의 산정은 어려운 실정이다. 이에 본 논문은 지반의 층상구조 파악만이 아닌 토목공사 등의 실 설계에 필요한 지반정수인 간극률을 산정할 수 있는 해석 방법 및 실험장비를 소개하려 한다. 본 논문은 전기비저항과 간극률 간의 상관관계에 대한 이론적 배경을 소개하고 새롭게 개발된 전기저항 콘 프로브 및 측정시스템을 소개하였다. 또한 개발된 장비의 현장 적용성을 검증하기 위해 실시한 현장시험과 그 결과를 소개하였다.

2. 이론적 배경

포화된 흙의 전기적인 성질의 차이를 이용하여 이방성, 함수비, 간극률 같은 지반의 특성을 분석할 수 있다. 포화된 지반의 전기전도도를 결정하는 요인은 3가지로 흙 입자의 전기전도도, 간극수의 전기전도도, 흙 입자의 비표면적 전기전도도이다. 위 3가지 요소로 대상지반 흙의 전기전도도는 아래와 같은 식 (1)로 표현된다.

$$\zeta_{mix} = (1-n)\zeta_p + n\zeta_{el} + (1-n)\frac{V_p}{g} \lambda_{dl} S_a \quad (1)$$

여기서, n 은 간극률, ζ_p 는 흙 입자의 전기전도도, ζ_{el} 는 간극수의 전기전도도, V_p 는 입자의 단위중량, g 는 중력, λ_{dl} 은 입자표면 전도도, S_a 는 입자의 비표면적이다(Santamarina et al. 2001).

해안지반의 경우 바닷물의 영향으로 식 (1)의 간극수의 전기전도도가 흙 입자의 전기전도도와 입자표면의 전기전도도보다 매우 커서 두 항을 무시할 수 있다. 그 결과 식 (1)은 식 (2)와 같이 변형 될 수 있다.

$$\zeta_{mix} = n \cdot \zeta_{el} \quad (2)$$

그러나, 위의 식 (2)는 입자의 크기가 무한하고 구조가 평행한 이상적인 경우에 적용할 수 있는 식으로 실제 흙에서의 전기전도도는 식(3)과 같이 Archie's의 경험식으로 표시할 수 있다.

$$\rho_{soil} = \rho_{el} \cdot n^\theta \quad (3)$$

여기서, ρ_{soil} 는 흙의 비저항, ρ_{el} 는 간극수의 비저항, n 은 간극율이다. θ 는 상수값으로 약 -1에서 -2.4의 범위의 값을 가지며 실험을 통해 산정할 수 있다(Archie 1942).

3. 전기저항 콘 프로브

3.1 전기저항 콘 프로브의 설계

전기저항 콘 프로브의 설계는 강도적, 전기적, 전기화학적, 그리고 기하학적 특성을 고려하여야 하며, 본 연구는 Lee (2003)의 연구에 기초하였다. 전기저항 콘 프로브는 시추기의 로드와 결합하여 관입을 실시하면서 대상지반의 비저항을 측정하는 장비로 전체의 모습은 그림 1과 같다. 해안지반 간극수는 근처 바닷물과 비슷한 화학적 성질을 가지고 있다(Hulbert et al. 1982). 그러므로 염분에 의한 부식을 최소화하기 위해 스테인레스 재질을 사용하여 제작하였다. 그림 1(a)는 프로브의 모습으로 총길이는 130mm, 중심전극의 직경 4mm, 두께 1.5mm, 외부전극 외경 10mm(스테인레스 튜브), 중심전극과 외부전극 사이는 폴리에틸렌 절연체로 구성되어 있다. 중심 전극과 외부전극에는 각각 2가닥씩 동축 전선이 연결되어 있다. 동축전선은 쉴드 도선망을 통해 신호의 누전이나 신호의 간섭을 차단하는 역할을 하여 효과적인 측정을 위해 전기저항 콘 프로브에 적용하였다. 연결된 전선 납땜 부분은 지하수에 의한 합선을 방지하기 위해 에폭시를 사용하여 방수 처리 하였다. 그림 1(b)는 탐침과 콘의 연결, 콘과 관입기 로드와의 연결을 그린 모식도이다.

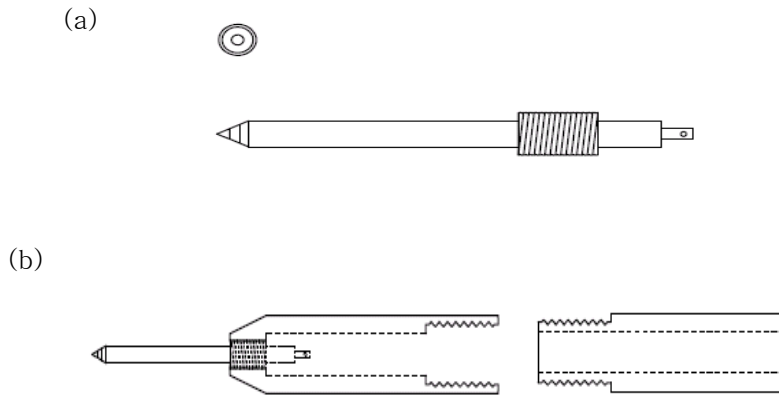


그림 1. 전기저항 콘 프로브 모식도:
 (a) 전기저항프로브; (b) 전기저항 프로브, 콘, 관입기 로드의 연결

3.2 전기저항 콘 프로브의 저항측정 및 Calibration

전기저항 콘 프로브에 적용한 전선 연결방식은 2터미널 방식(그림 2)으로 중심전극과 외부전극사이의 전위와 전류를 전선 두 쌍이 각각 측정하여 두 전극사이의 저항($R = \frac{V}{I}$)을 측정한다.

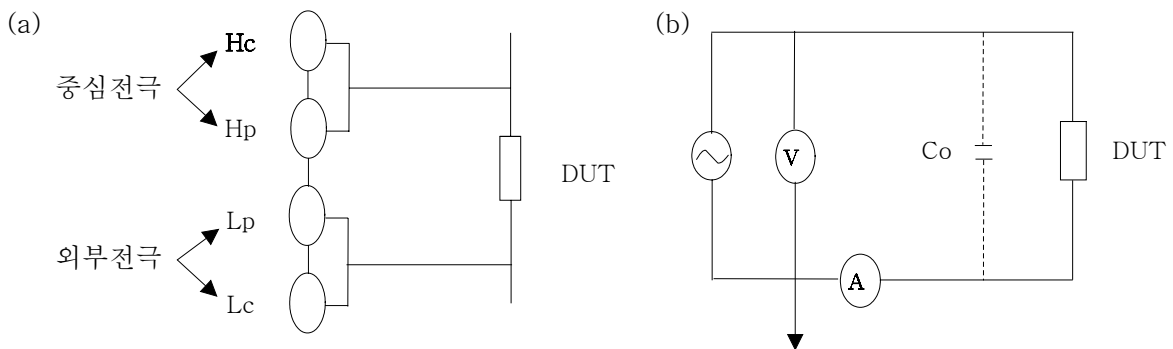


그림 2. 2터미널 방식: (a) Connection Diagram; (b) Schematic diagram
 Hc, Hp: 중심전극; Lc, Lp: 외부전극; DUT(Device under Test): 관입시 프로브 주변의 흙

본 연구에서 전기저항 콘 프로브와 함께 흙의 전기저항을 측정하기 위해 LCR Meter (Intec LCR-819, 최대주파수 100kHz, 최대전압 1.275V)를 사용하였다. LCR Meter는 전자부품 및 시료의 전기적 특성을 관찰하는 장비로 주파수에 따른 전기적 특성을 측정할 수 있다. 측정이 가능한 요소는 L (인덕턴스: H), C(캐패시턴스: F), Z(임피던스: Ω), Q(Quality factor) 등이다.

프로브는 기하학적인 특성에 의해 그 측정 저항값이 달라진다. 그러므로 측정된 저항값을 직접 사용하지 않고 물질의 고유성질인 비저항 값으로 환산하여 사용한다. 측정된 저항과 비저항의 관계는 식 (4)와 같다.

$$R = \alpha \cdot \rho \quad (4)$$

여기서 ρ 는 비저항, R은 저항, α 는 상수이다.

보정은 전기저항 프로브로 측정한 저항과 그 저항값이 나타내는 비저항 값의 관계를 확인하는 과정으로 식 (4)의 α 를 도출할 수 있다. 프로브의 전극 길이, 재질, 끝단의 형상, 연결케이블 등의 원인에 의해 α 값이 각각 달라 전기저항 콘 프로브는 반드시 보정이 필요하다. 보정은 각기 다른 농도의 소금 용

액의 전기전도도를 측정하여 전기전도도의 역수인 비저항을 계산하고 프로브를 각각의 소금 용액에 담가 각 용액의 저항값을 측정하여 비저항과 저항사이의 관계를 도출한다. 본 연구에서 사용된 전기저항 콘 프로브의 보정 결과는 그림 3(a)와 같고 α 는 0.502cm^{-1} 이다. 그림 3(b)는 전기저항 프로브보다 직경이 작은 니들 프로브의 캘리브레이션 결과이다. 니들 프로브 역시 각각의 형상이 달라 α 는 상이하지만 측정된 점들은 선형의 관계를 가지고 있다. 즉, 동일 대상지반에 각기 다른 전기저항 탐침 프로브로 측정된 상이한 저항값들을 보정을 통해 그 지반의 고유정수인 비저항값으로 환산시킬 수 있다.

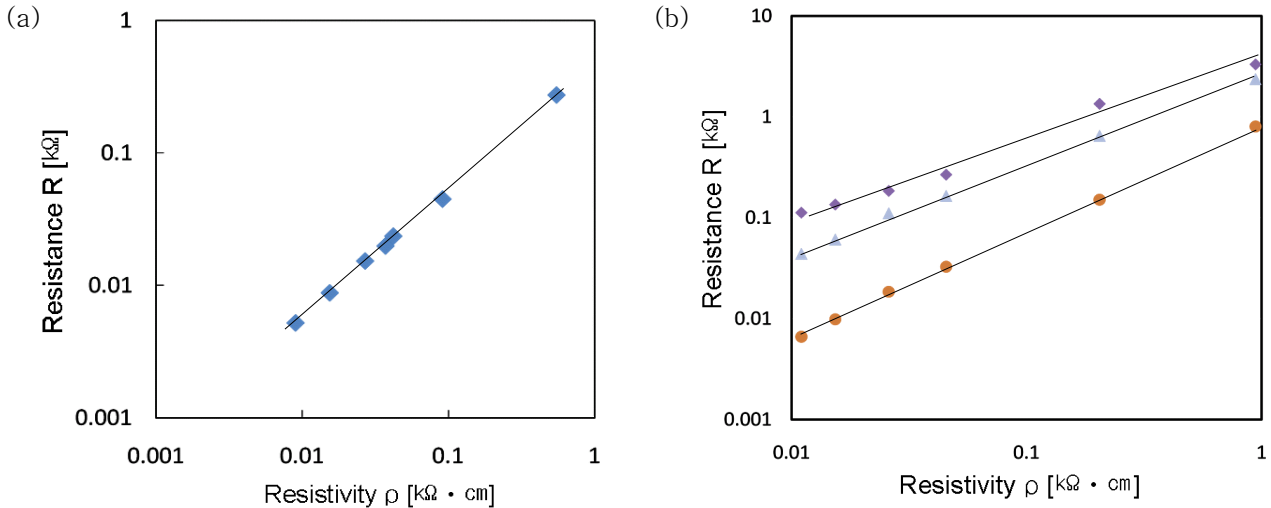


그림 3. 전기저항 프로브의 보정: (a) 전기저항 콘 프로브; (b) 소형 전기저항 탐침.

4. 현장실험

4.1 실험 장비 구성

전기저항 콘 프로브의 현장실험을 수행한 장소는 매립으로 조성된 인천의 000 현장이다. 현장 실험은 그림 4와 같이 유압식 시추기를 이용하여 프로브를 관입하여 수행하였다. 측정장비로는 전기저항 측정을 위한 LCR Meter, 데이터를 저장하기 위한 컴퓨터가 사용되었다. 전기저항 콘 프로브는 시추기의 로드와 결합되어 있고 케이블은 기타 지반조사 장비와 유사하게 로드 중앙의 빈 공간을 통하여 LCR Meter에 연결하였다. LCR Meter와 컴퓨터는 서로 연결시켜 측정에 따라 자동으로 데이터를 저장하도록 하였다. 전기저항 콘 프로브는 분당 20cm의 속도로 관입하며 초당 약 2개의 데이터 측정하였다.

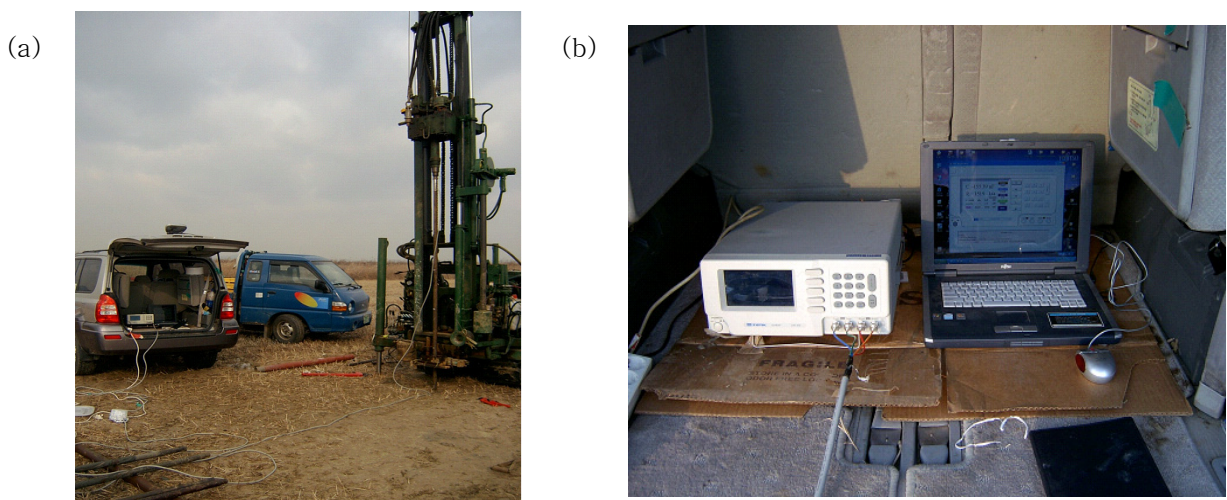


그림 4. 전기저항 콘 프로브 현장 실험: (a) 실험 전경; (b) 측정장치.

4.2 현장실험 결과

전기저항 콘 프로브를 관입하면서 전기저항을 측정하였으며, 측정된 전기저항값에 비저항 계수 α (식 4 참조)를 이용하여 지반의 전기비저항값을 산정할 수 있다. 깊이에 따라 산정된 전기비저항값을 그림 5 (a)에 나타내었다. 또한 표준관입시험결과와 전기저항 콘 프로브를 비교하기 위하여 표준관입값을 그림 5(b), 그리고 지반조건을 그림 5(c)에 나타내었다. 표준관입시험공은 전기저항콘프로브 시험공과 1m의 간격을 유지하였다.

지반조건을 살펴보면 0.0m~1.5m는 점토질 실트의 매립층, 1.5~9.0m는 매우 연약한 실트질 점토의 퇴적층, 9.0~12m는 견고한 실트 퇴적층, 12~16m는 견고한 점토 섞인 모래질 실트 퇴적층으로 나타났다. 지하수위는 지표면으로부터 깊이 1.3m에 존재한다. 1.5~9.0m의 매우 연약한 실트질 점토층에서 비교란 시료를 채취하였다.

실험을 실시한 현장은 지하수위가 1.3m이므로 1m부터 2m까지는 간극내의 공기의 영향으로 비저항값이 크게 측정되었다. 약 2m부터 9m까지 일정한 비저항 값이 측정되고 9m 이후 비저항 값이 증가하였다. 한편 표준관입저항치도 전기비저항과 유사하게 깊이 2m~8m구간에서 5회 미만으로 일정하며, 8m 이후부터는 N치가 증가하는 것으로 나타났다. 전기저항 콘 프로브는 지반의 간극수, 간극울의 공간적 분포에 영향을 받지만 표준관입시험치는 강도특성에 영향을 받음에 주의하여야 한다.

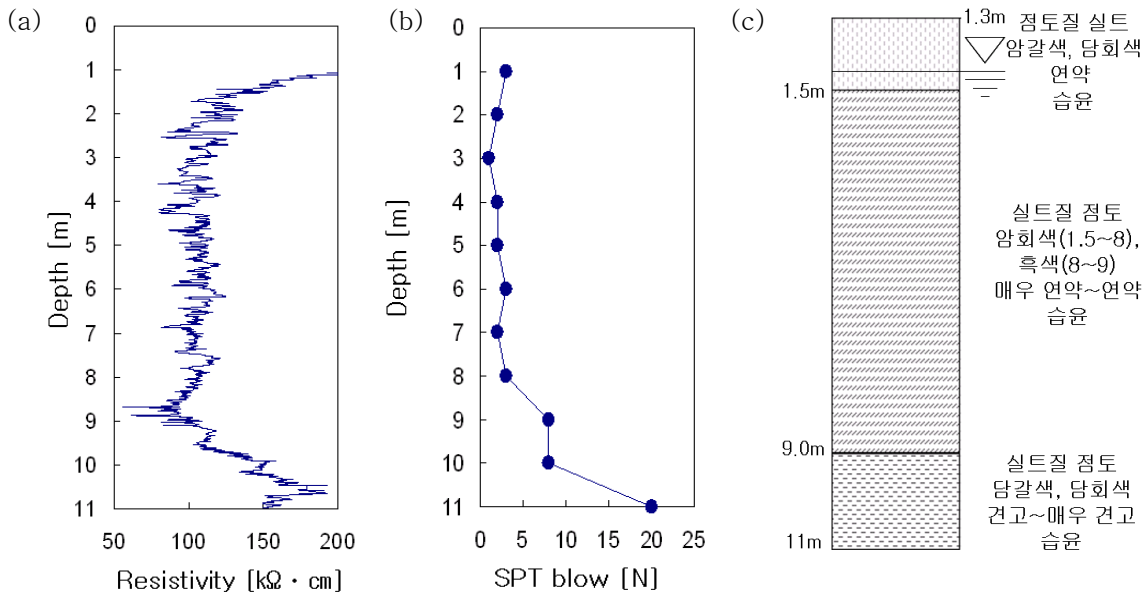


그림 5. 현장실험 결과: (a) 깊이별 비저항; (b) 표준관입저항치; (c) 주상도

4.3 비교란 시료 특성

1.5~9.0m의 매우 연약한 실트질 점토층중 깊이 3m와 6m에서 채취된 시료에 대한 기본 물성값 표 1에 나타내었다. 현장의 간극울을 산정하기 위해서는 식 (3)에서와 같이 간극의 전기전도도 또는 간극수의 비저항값의 산정이 필요하다. 간극수의 특성을 산정하기 위해 3m 및 6m 깊이에서 채취된 시료에 대하여 약 25g씩 각각 3개의 시료를 채취하였다. 즉, 6개의 시료를 추출하였으며 이 시료를 원심분리기를 4000RPM에서 약 3시간 작동하여 간극수와 시료를 분리하였다. 분리된 간극수를 모아 측정한 각 깊이별 간극수의 전기전도도 및 비저항값을 표 1에 나타내었다. 간극수의 전기 특성은 거의 유사한 것으로 나타났다.

표 1. 비교란 시료 및 간극수 특성

깊이	함수비 (%)	비중	초기간극비 (e_0)	단위중량 (kN/m^3)	간극수 전기전도도 (ms/cm)	간극수 비저항 ($k\Omega \cdot cm$)
3.0m	26.0	2.64	0.69	18.54	45.6	0.022
6.0m	26.8	2.58	0.69	18.93	44.7	0.022

4.5 현장 간극을 산정

현장의 간극을 산정은 Archie's Law의 경험식을 이용한다. Archie의 law의 경험식은 식 (3)에서 언급한 것과 같으며 현장의 간극률을 산정하기 위해서 실험적으로 구해지는 θ 값을 결정하여야 한다. 또한 현장의 간극률 n 은 채취된 시료에 대하여 $S \cdot e = w \cdot G_s$ 관계를 적용하여 산정하였다. 추출된 비교란 시료의 심도가 지하수위인 1.3m보다 깊은 3.4m와 6.6m이므로 포화도 S 는 1로 가정하였다. 함수비와 비중은 물성실험을 통해 구한 데이터를 사용하였다. 즉, 물성실험에서 산정된 값을 적용하여 θ 값을 산정할 수 있으며 그 값은 약 -1.69로 나타났다. 그러나 현장실험결과가 많아지고 우리나라 해안지역에 대한 θ 값에 대한 자료가 축적되면 이와 같은 과정은 생략될 수 있다. θ 값, 시료 간극수의 비저항 값, 현장 관입시험으로 구한 흙의 비저항을 식 (3)에 대입하여 현장의 간극률 분포를 산정할 수 있으며 그 결과는 그림 6과 같다. 그림 6과 같이 깊이 1.5~9m의 실트질 점토의 퇴적층은 9~12m의 점토 실트질 퇴적층보다 큰 간극율을 가지고 있음을 확인할 수 있었다. 이 결과는 표준관입저항치가 관입깊이 1~8m 사이에서는 1회~5회 사이에 머물다가 관입깊이 9m 이후에는 관입저항치가 증가하는 결과와 유사하다.

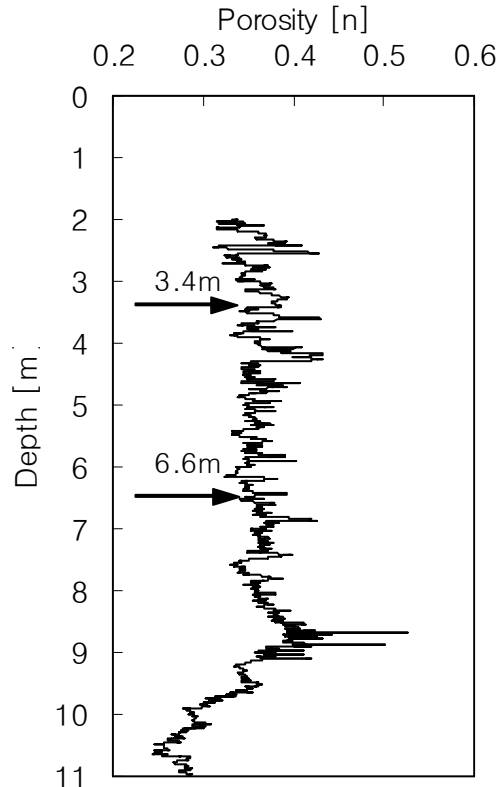


그림 6. 깊이별 간극률 분포

5. 결론

포화된 지반의 해안지반의 현장 간극율은 전기 저항과 직접적인 관련이 있다. 이와 같이 현장 간극율과 직접적으로 관련이 있는 전기저항을 이용하여 해안지반의 간극율을 효과적으로 산정하기 위한 전기저항 콘 프로브를 개발하여 현장에 적용하였다. 개발된 전기저항 콘 프로브는 선단은 콘 형상으로 되어 있으며 선단에 전기저항을 측정하도록 되어 있다. 선단의 전기저항은 LCR미터를 이용하여 산정하도록 되어 있다. 전기저항은 콘의 형상에 의존하므로 전기비저항으로 환산하여 전기저항 콘 프로브의 적용성을 증대시켰다.

개발된 전기저항 콘 프로브를 인천 000 현장에서 관입깊이 11m까지 적용하였다. 또한 기존 지반조사방법과 비교하기 위하여 콘 프로브 시험공과 1m 떨어진 곳에 표준관입시험을 실시하였다. 표준관입 시험 시 점토지반에서 비교란 시료를 채취하였으며 비교란 시료 중 일부에서 시료를 채취하여 간극수의 특성을 분석하였다. 분석된 간극수의 특성을 이용하여 현장 지반의 전기 비저항 프로파일을 얻을 수 있었다. 전기저항 프로파일과 추출된 시료의 초기 간극비를 적용하여 Archie's law의 상수값 θ 을 결정할 수 있었다. 계산된 상수값과 측정된 전기비저항을 이용하여 현장 간극률 프로파일을 얻을 수 있었다. 현장 간극률 프로파일은 표준관입저항치와 반비례로 관계로 나타나 강도특성과 좋은 상관관계가 있음을 알 수 있었다. θ 값을 효과적으로 평가할 수 있는 방법에 대한 연구가 필요하며, 해안지역의 θ 값에 대한 자료가 축적되면, 현장의 간극률을 매우 효과적으로 평가할 수 있을 것으로 판단된다.

6. 감사의 글

본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁 시행한 2005년도 지역특성화 연구개발사업 (과제번호: B04-01)의 지원으로 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

7. 참고 문헌

1. 방은석, 성낙훈, 김영상, 박삼규, 김정호, 김동수(2007), “연약지반조사를 위한 전기비저항탐성과 Flat DMT 장비의 개발 및 적용”, 한국물리탐사학회 · 대한지구물리학회 2007 공동학술대회, p.248~253.
2. Archie, G .E. (1942) The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics, Transactions of the American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers, 146, 54-62.
3. Hulbert, M. H., Bennett, R. H., and Lambert, D. N. (1982) Seabed geotechnical parameters from electrical conductivity measurements, Geo-Marine Letters, 2, pp.219-222.
4. Lee, J. S. (2003) High resolution geophysical techniques for small-scale soil model testing. Ph.D. Thesis, Civil Engineering, Georgia Institute of Technology, Atlanta.
5. Santamarina, J. C., Klein, K. A., and Fam, M. A. (2001) Soils and Waves - Particulate Materials Behavior, Characterization and Process Monitoring, John Wiley and Sons, New York.